第十二章　中子星

12.1 中子星的形成

- 恆星演化晚期時，如恆星核心的質量大於 1.4 太陽質量 (陳德拉錫加極限)，引力便會戰勝電子簡併壓力，星核不斷收縮，密度不斷增加。
- 當星核密度達至約 10^{12} g/cc，電子被壓進原子核內，與質子結合為中子，形成中子物質

  質子 + 電子 → 中子 + 中微子

- 根據量子力學，中子在過度壓迫之下便會產生強大的壓力反抗，稱為中子簡併壓力 (Neutron degeneracy pressure)。當星核密度達至約10^{12} g/cc 時，中子簡併壓力急劇上升，反抗收縮。
- 塌縮下墜的物質突然衝擊堅硬的核心時發生反彈，產生向外傳播的衝擊波，觸發外層核聚變，發生巨大的超新星爆炸，恆星外層被完全炸毀
- 如果核心的質量 < 2-3 太陽質量，中子簡併壓力便會抗衡核心進一步收縮，形成一顆穩定、非常細小但密度極高的中子星

12.2 中子星的特徵

- 半徑約為 10 km，質量約 1.4 太陽質量
- 密度極高約為10^{14}-10^{15} g/cc，相當於把整個太陽壓縮至香港般大小，或把整個香港壓縮至一支茶匙般大小
- 中子星的表面引力極強
  - 一個人站在中子星表面上重達一百萬噸
  - 所有表面特徵在本身的重量下塌陷，因此中子星表面沒有任何山峰或特徵
  - 中子星是一個極完美的球體，外殼是非常堅硬的金屬，內層是中子物質

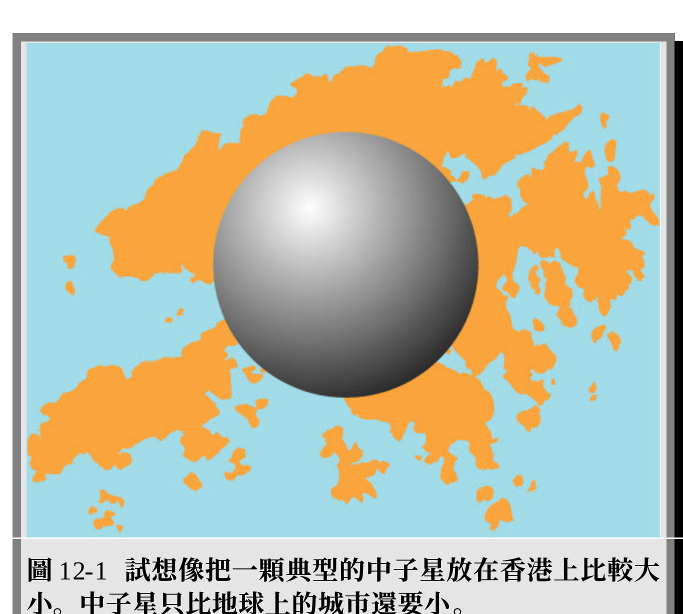


圖 12-1　試想像把一顆典型的中子星放在香港上比較大小。中子星只比地球上的城市還要小。

12.3 脈衝星

- 根據角動量守恆定律 (Conservation of angular momentum)，星核心收縮時旋轉速度加快 (參看圖 12-2 溜冰者的例子)。
  - 中子星形成時星核大量收縮，使中子星急促旋轉。中子星自轉速度為每秒數次至數百次
  - 週期穩定，並可被準確地量度至 17 個小數位
- 星核收縮「壓縮」了恆星原本的磁場
  - 中子星的磁場極強，約為 10^{12} 高斯。相比之下，地球表面的磁場只有 0.5 高斯
  - 帶電粒子沿著磁力線加速，發出輻射束，隨著中子星自轉，輻射束一掃而過，形成所謂燈塔效應 (Lighthouse effect)
- 如中子星的輻射束掃過地球，在地球上便觀測到非常有規律和急促的脈衝，那顆中子星便稱為脈衝星 (Pulsar)
  - 最初發現的脈衝星週期為 1.3373019 秒
- 脈衝星發射各種波長的輻射，由無線電波至 X 射線。
  - 例如蟹狀星雲 (Crab nebula) M1 內的脈衝星發射可見光和 X 射線
- 恆星輻射時失去轉動能量，脈衝星隨著年歲增長而轉得越來越慢，輻射能量亦減少，因此脈衝星只能夠在 10^7 年內產生可量度的輻射

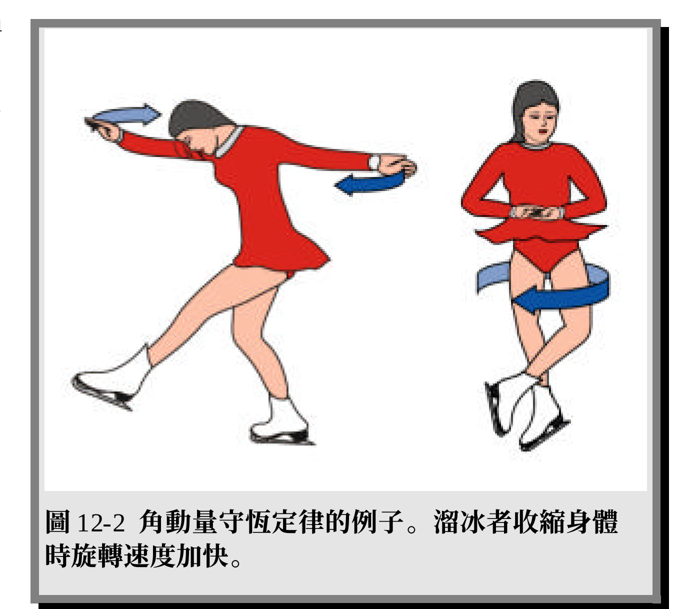


圖 12-2 角動量守恆定律的例子。溜冰者收縮身體時旋轉速度加快。

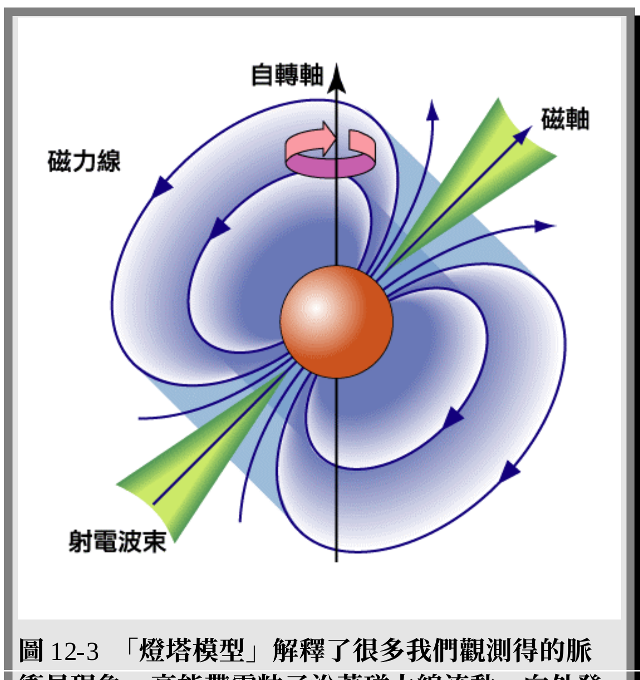


圖 12-3 「燈塔模型」解釋了很多我們觀測得的脈衝星現象。高能帶電粒子沿著磁力線流動，向外發射輻射束。

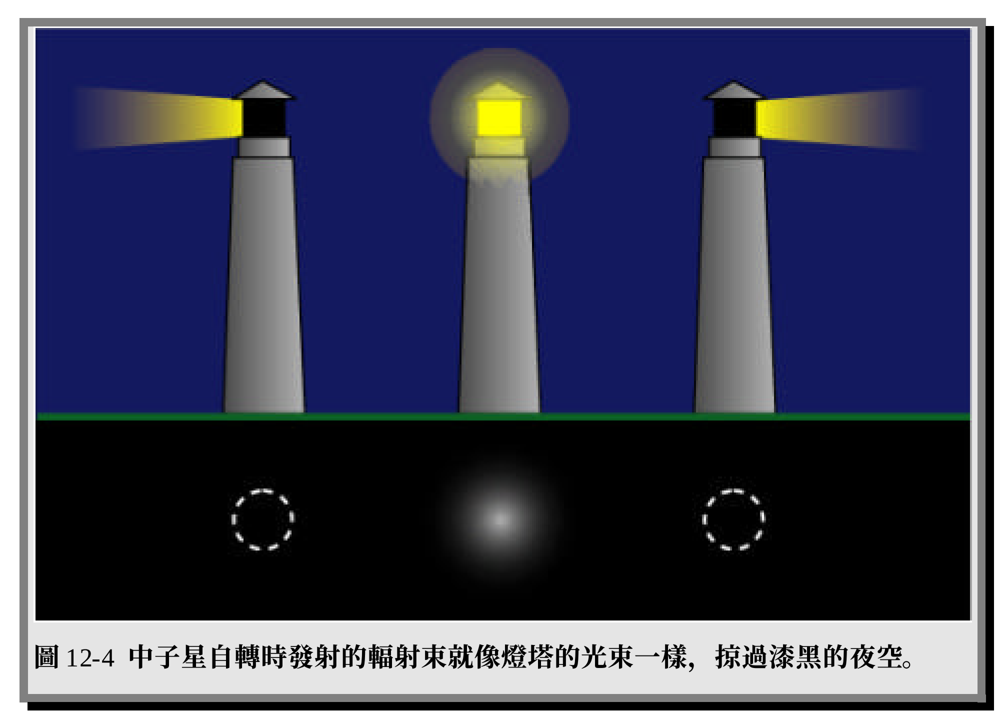


圖 12-4 中子星自轉時發射的輻射束就像燈塔的光束一樣，掠過漆黑的夜空。

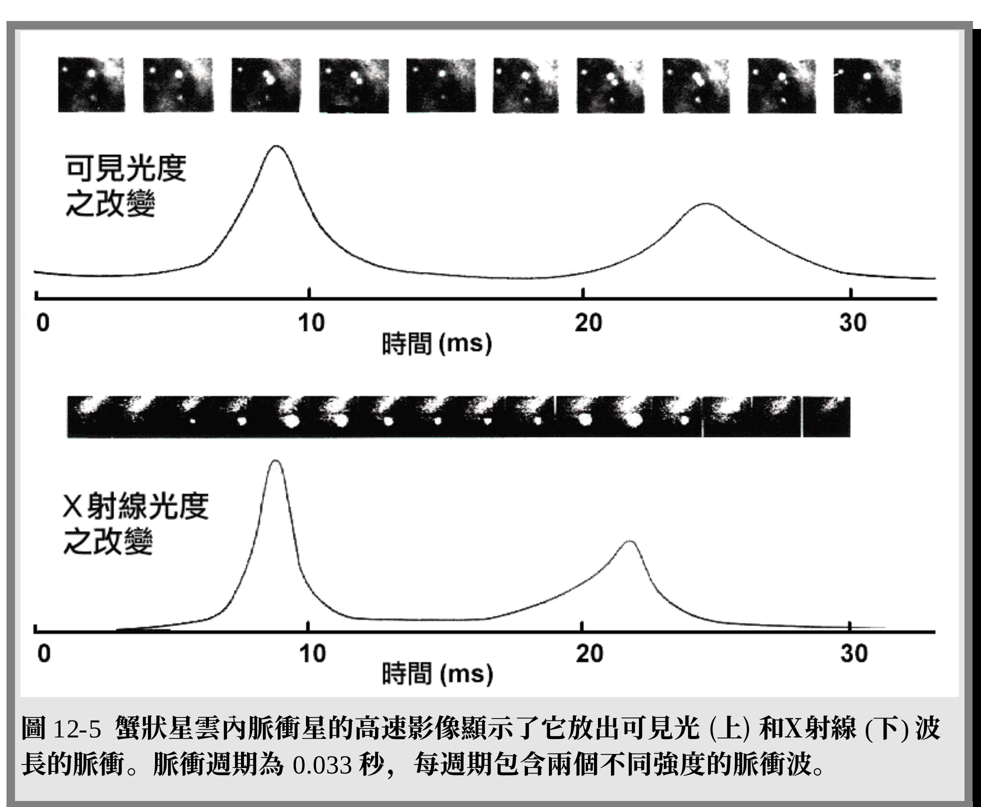


圖 12-5 蟹狀星雲內脈衝星的高速影像顯示了它放出可見光 (上) 和X射線 (下) 波長的脈衝。脈衝週期為 0.033 秒，每週期包含兩個不同強度的脈衝波。

12.4 雙星系統內的脈衝星

- 雙星系統內其中一顆或兩顆恆星皆是脈衝星。
- 中子星可能吸掉伴星部份物質
  - 中子星的表面引力非常強大，物質撞擊它的表面時釋放巨大能量，溫度可達 10^8 K，發射 X 射線和伽瑪射線
  - 例如在武仙座 X-1系統，伴星是一顆巨星，其質量以每年 10^{-9} 太陽質量的速度傳給中子星。伴星週期性地擋著從中子星射出來的 X 射線。
  - 伴星物質墜落中子星是一個複雜的過程，可能形成吸積盤，導致不規則的輻射模式 (稱為 X 射線爆發)
  - 中子星可能於數億年內把伴星完全「消化」

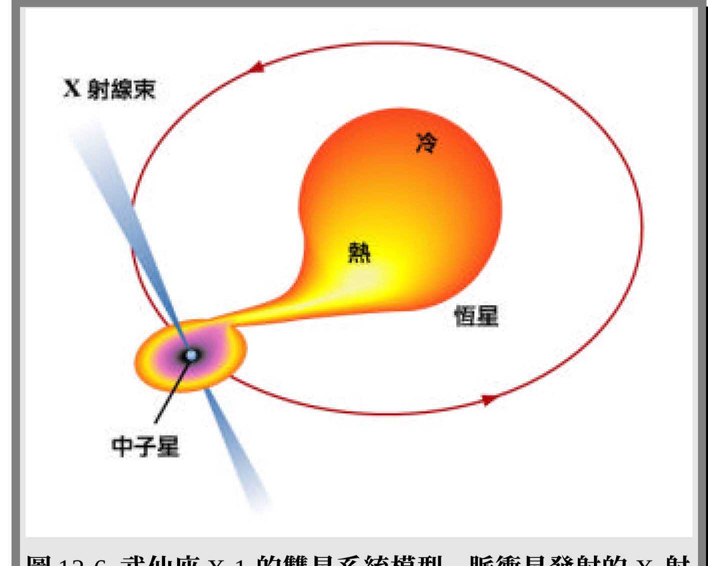


圖 12-6 武仙座 X-1 的雙星系統模型。脈衝星發射的 X 射線把伴星接近它的一面加熱至 20,000 K。當脈衝星沿著圖中顯示的虛線軌道轉動時，伴星的冷熱兩面不斷交替，造成視亮度的變化。

- 脈衝雙星 (Binary pulsar)：雙星系統內的兩顆恆星都是中子星。
  - 廣義相對論預測這兩顆中子星在彼此強大引力場作用下繞對方公轉時，便會發出引力波，使系統緩慢地失去能量，公轉軌道漸漸收縮
  - 例如 PSR1913+16：雙星系統的公轉週期越變越短，公轉軌道不斷收縮，與相對論的預測在數值上完全一致
  - 兩顆星沿螺旋形的軌道緩慢地移近對方，最後發生碰撞，變成黑洞？